

MODEL SATU DIMENSI VERTIKAL DISTRIBUSI SUSPensi DI ESTUARI BELAWAN

Bambang Triatmodjo *)

INTISARI

Transpor sedimen suspensi di estuari adalah sangat kompleks yang dipengaruhi oleh pasang surut, debit sungai, kualitas air dan sifat sedimen. Distribusi konsentrasi suspensi merupakan fenomena tidak permanen.

Model satu dimensi vertikal distribusi suspensi ini digunakan untuk mengetahui distribusi vertikal konsentrasi suspensi di estuari, dengan memperhitungkan proses erosi dan pengendapan. Model didasarkan pada persamaan kontinuitas sedimen suspensi untuk aliran tidak permanen. Model diaplikasikan di estuari Belawan pada lokasi di depan rencana bangunan pengambilan PLTGU Belawan. Pengaruh transpor pada arah horisontal (memanjang dan melintang) tidak ditinjau. Transpor konveksi dalam arah vertikal diabaikan, mengingat kecepatan aliran vertikal sangat kecil. Kondisi batas di muka air adalah fluks sedimen nol, sedang di dasar fluks sedimen sama dengan fluks erosi dan pengendapan. Kecepatan aliran digunakan untuk menentukan besarnya tegangan geser dasar. Kecepatan endap sedimen didasarkan pada studi yang dilakukan di laboratorium dengan menggunakan lumpur di dalam air asin (Thorn dalam Mehta, 1984). Koefisien difusi vertikal yang didasarkan pada persamaan Elder (1959) digunakan dalam model ini. Persamaan kontinuitas sedimen diselesaikan dengan metoda beda hingga skema implisit.

Hasil model berupa distribusi konsentrasi dalam arah vertikal dan fungsi waktu diberikan dalam bentuk grafik.

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap (PLTGU) Belawan akan dikembangkan kapasitasnya. Untuk itu perlu ditambah kapasitas air pendingin yang diambil dari sungai (estuaria) Belawan. Sedapat mungkin air yang diambil tersebut sesedikit mungkin mengandung bahan suspensi. Untuk maksud tersebut perlu suatu studi guna menentukan elevasi bangunan pengambilan. Hal ini mengingat bahwa konsentrasi suspensi

konsentrasi suspensi.

Mekanisme gerak sedimen di estuari merupakan fenomena tidak permanen tiga dimensi yang dipengaruhi oleh gaya-gaya hidrodinamik, sifat-sifat air dan sedimen. Banyaknya faktor yang berpengaruh tersebut mengakibatkan proses sedimentasi yang kompleks.

*) Dr. Ir. Bambang Triatmodjo adalah staf pengajar Jurusan Teknik Sipil FT UGM

Dalam tulisan ini hanya ditinjau keadaan yang sederhana dengan melakukan penyederhanaan dari model tiga dimensi menjadi model satu dimensi vertikal, yang berarti tanpa meninjau transpor dalam arah horisontal. Kondisi batas di dasar estuari adalah pertukaran antara dasar dan aliran. Akibat pengaruh gaya berat partikel, sedimen mengendap di dasar. Karena pengaruh tegangan geser dasar dan turbulensi, partikel yang tererosi akan tersuspensi. Erosi terjadi apabila tegangan geser dasar (τ_b) yang ditimbulkan oleh aliran lebih besar dari tegangan kritik erosi dari endapan. Jika tegangan geser dasar lebih kecil dari tegangan kritik endap, sedimen suspensi akan mengendap di dasar.

FORMULASI MATEMATIS

Model distribusi vertikal sedimen suspensi didasarkan pada persamaan kontinuitas sedimen untuk aliran tidak permanen.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial (W_s C)}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad \dots (1)$$

dengan :

- C : konsentrasi sedimen suspensi
- u : kecepatan horisontal memanjang
- v : kecepatan horisontal melintang
- w : kecepatan vertikal
- W_s : kecepatan endap sedimen
- t : waktu
- K_x, K_y, K_z : koefisien difusi se arah sumbu x, y, dan z.

Pada model satu dimensi vertikal, transpor konveksi dan difusi horisontal tidak diperhitungkan. Transpor konveksi vertikal juga diabaikan karena komponen kecepatan vertikal sangat kecil. Dengan demikian persamaan (1) menjadi :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial (W_s C)}{\partial z} = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad \dots (2)$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa dua faktor yang sangat berpengaruh pada distribusi vertikal konsentrasi adalah kecepatan endap dan koefisien difusi vertikal.

KONDISI BATAS

Persamaan (1) dapat diselesaikan apabila kondisi batas di muka air dan di dasar saluran (estuaria) diketahui. Tidak ada perpindahan partikel suspensi melalui muka air, sehingga kondisi batas adalah :

$$(K_z \frac{\partial C}{\partial z}) - (W_s C) = 0 \quad \dots\dots\dots (3a)$$

Di dasar saluran terjadi erosi atau sedimentasi yang tergantung pada tegangan geser dasar dan sifat-sifat endapan. Dengan demikian fluks sedimen melalui dasar adalah fluks erosi dan sedimentasi,

$$(K_z \frac{\partial C}{\partial z}) - (W_s C) = S_e + S_d \quad \dots\dots\dots (3b)$$

dengan :

$$S_e = M \left(\frac{\tau_b - \tau_{ce}}{\tau_b} \right)$$

$$S_d = - W_s C \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}} \right)$$

dengan :

S_e : fluks erosi

S_d : fluks sedimentasi

M : konstanta yang tergantung pada konsentrasi endapan

τ_b : tegangan geser dasar

τ_{ce} : tegangan kritis erosi dari endapan dasar

C : konsentrasi suspensi

τ_{cd} : tegangan kritis sedimentasi

KECEPATAN ENDAP

Kecepatan endap sedimen suspensi dipengaruhi oleh konsentrasi suspensi dan salinitas. kedua faktor tersebut menyebabkan terjadinya flokulasi, yang sampai pada harga tertentu akan memperbesar kecepatan endap. Gambar 1 (Thorn dalam Mehta, 1984) menunjukkan variasi kecepatan endap W_s dengan konsentrasi suspensi C . Berdasar gambar tersebut, untuk konsentrasi antara 0,1 dan 3,5 gr/l, kecepatan endap mempunyai bentuk :

$$W_s = 0,513 C^{1,29} \quad \dots\dots\dots (4a)$$

Untuk konsentrasi lebih dari 3,5 gr/l, W_s berkurang dengan kenaikan nilai C , dan berbentuk :

$$W_s = 2,6 (1 - 0,008 C)^{4,65} \quad \dots\dots\dots (4b)$$

KOEFISIEN DIFUSI

Aliran dianggap tidak stratifikasi, artinya rapat massa air pada vertikal adalah konstan. Koefisien difusi vertikal diberikan oleh persamaan berikut :

$$K_z = \phi \epsilon_z \quad \dots\dots\dots (5)$$

dan

$$\phi_z = 0,067 u_* H$$

dengan :

- K_z : koefisien difusi vertikal
- ϕ : konstanta yang biasanya dianggap satu
- ϵ_z : koefisien viskositas turbulen
- u_* : kecepatan geser
- H : kedalaman air

EROSI DAN SEDIMENTASI

Proses erosi dan sedimentasi dipengaruhi oleh dua hal yaitu, karena pengaruh gaya berat partikel sedimen akan mengendap di dasar, sedang karena pengaruh turbulensi partikel halus di dasar yang telah bergerak akan tersuspensi. Erosi sedimen akan terjadi apabila tegangan geser τ_b yang ditimbulkan oleh aliran adalah lebih besar dari tegangan kritis erosi sedimen. Apabila tegangan geser lebih kecil dari tegangan kritis endap, maka sedimen akan mengendap. Apabila tegangan geser dasar di antara kedua harga tegangan kritis tersebut maka sedimen akan dalam kondisi melayang dan bergerak sepanjang aliran.

Di dalam beberapa literatur dibuat suatu hubungan antara fluks erosi sebagai fungsi dari tegangan geser dasar atau perbedaan antara tegangan geser dasar dan tegangan kritis erosi, yang biasa disebut dengan tegangan geser dasar terlampaui ($\tau_b - \tau_{ce}$). Walter Puls (dalam Mehta, 1984) melakukan penelitian tentang tegangan kritis erosi sedimen estuari Belawan. Hasil percobaan ditunjukkan dalam gambar 2. yang memberikan harga fluks erosi sebagai fungsi dari tegangan geser dasar terlampaui normal ($(\tau_b - \tau_{ce}) / \tau_{ce}$). Dari gambar tersebut dibuat rumus fluks erosi dalam bentuk :

$$S_e = 0,8 \{ (\tau_b - \tau_{ce}) / \tau_{ce} \}^{0,88} \quad \dots\dots\dots (6)$$

Apabila tegangan geser dasar lebih kecil dari suatu harga tertentu, sedimen suspensi akan diendapkan di dasar. Pengendapan ini

terjadi selama periode kecepatan kecil, yaitu di sekitar titik puncak dan lembah pasang surut.

Percobaan yang dilakukan terhadap sedimen estuari Belawan juga memberikan harga tegangan kritik endap. Percobaan tersebut menunjukkan bahwa pengendapan terjadi apabila tegangan geser dasar kurang dari $0,05 \text{ N/m}^2$. Dengan demikian dalam studi ini tegangan kritik endap didasarkan pada percobaan tersebut, yaitu :

$$\tau_{cd} = 0,05 \text{ N/m}^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

Berdasarkan percobaan yang dilakukan oleh Mehta (1984), didapat suatu rumus fluks sedimen yang diendapkan tiap satuan luas dan waktu berikut ini.

$$S_d = -W_s C \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

dengan :

- S_d : fluks pengendapan
- W_s : kecepatan endap
- C : konsentrasi suspensi
- τ_b : tegangan geser
- τ_{cd} : tegangan kritik endap

TEGANGAN GESER DASAR

Kecepatan aliran di atas bidang batas (dasar saluran) menyebabkan terjadinya tegangan geser dasar yang dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$\tau_b = \rho \frac{f}{8} u^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

dengan :

- ρ : rapat massa air
- f : koefisien geser, diambil sebesar 0,04
- u : kecepatan rerata

METODE PENYELESAIAN

Persamaan (2) dan kondisi batas diselesaikan dengan metoda beda hingga skema implisit. Gambar 3 menunjukkan skema perhitungan. Dengan menggunakan skema tersebut, persamaan (2) dapat ditulis dalam bentuk beda hingga :

$$\begin{aligned}
& \frac{C_j^{n+1} - C_j^n}{t} - \frac{W_{sj+1} C_{j+1}^{n+1} - W_{sj-1} C_{j-1}^{n+1}}{z_{j+1} - z_{j-1}} = \\
& \frac{0,5(K_{z_{j+1}} + K_{z_j}) \frac{C_{j+1}^{n+1} - C_j^{n+1}}{z_{j+1} - z_j} - 0,5(K_{z_j} + K_{z_{j-1}}) \frac{C_j^{n+1} - C_{j-1}^{n+1}}{z_j - z_{j-1}}}{0,5(z_{j+1} - z_{j-1})} \quad (10)
\end{aligned}$$

Persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk :

$$A_j C_{j-1}^{n+1} + B_j C_j^{n+1} + D_j C_{j+1}^{n+1} = E_j \quad (11)$$

Persamaan (11) diselesaikan dengan metoda sapuan ganda ("double sweep") dengan anggapan terdapat hubungan berikut ini.

$$C_j^{n+1} = P_j C_{j+1}^{n+1} + Q_j \quad (12a)$$

atau

$$C_{j-1}^{n+1} = P_{j-1} C_j^{n+1} + Q_{j-1} \quad (12b)$$

Substitusi persamaan (12b) ke dalam persamaan (11),

$$C_j^{n+1} = \frac{D_j}{A_j P_{j-1} + B_j} C_{j+1}^{n+1} + \frac{E_j - A_j Q_{j-1}}{A_j P_{j-1} + B_j} \quad (13)$$

Berdasarkan persamaan (12a) dan (13) didapat :

$$\begin{aligned}
P_j &= \frac{D_j}{A_j P_{j-1} + B_j} \\
Q_j &= \frac{E_j - A_j Q_{j-1}}{A_j P_{j-1} + B_j}
\end{aligned}$$

Hitungan dilakukan dalam dua fase. Pertama kali dihitung dan disimpan koefisien P dan Q untuk semua titik bergerak dari atas ke bawah. Pada waktu sampai di dasar, kondisi batas memungkinkan untuk menghitung C_N^{n+1} pada titik tersebut. Harga C_N^{n+1} digunakan untuk menghitung harga C_{N-1}^{n+1} dengan persamaan (13). Kemudian hitungan dilanjutkan dari bawah ke atas, dengan menghitung C_i^{n+1} , ($i=N, \dots, 1$) dengan menggunakan harga P dan Q yang telah didapat sebelumnya. Dengan menggunakan prosedur tersebut akan dapat dihitung nilai C pada waktu t_{n+1} . Nilai C yang didapat tersebut digunakan untuk menghitung nilai C pada langkah berikutnya. Demikian seterusnya sehingga diperoleh konsentrasi pada kedalaman estuari dan setiap saat.

HASIL MODEL DAN PEMBAHASAN

Model satu dimensi vertikal diaplikasikan pada stasiun di depan intake. Dalam model ini kedalaman aliran dibagi menjadi 17 titik hitungan. Titik hitungan di dekat dasar dibuat lebih rapat untuk mendapatkan hasil yang lebih halus mengingat gradien konsentrasi di daerah tersebut besar. Kecepatan dan kedalaman aliran yang digunakan dalam model ini adalah hasil dari model aliran air. Hitungan dilakukan dengan kondisi awal 1 gr/ltr. Tegangan geser dasar sebagai fungsi waktu di lokasi intake ditunjukkan pada Gambar 4.

Pada gambar tersebut juga ditunjukkan tegangan kritik endapan dan tegangan kritik erosi. Erosi terjadi apabila tegangan geser dasar lebih besar dari tegangan kritik erosi. Sedang endapan terjadi apabila tegangan geser lebih kecil dari tegangan kritik endap. Tampak bahwa dalam satu hari terjadi dua kali erosi. Erosi pertama terjadi waktu air surut selama + 2,1 jam, sedang periode kedua waktu pasang selama + 2,5 jam. Endapan terjadi empat kali dengan periode sangat pendek yaitu masing-masing sekitar 50 menit. Di luar waktu tersebut terjadi transpor suspensi.

Konsentrasi suspensi pada permukaan air, tengah kedalaman (+6 m di bawah muka air rerata), dan dasar ditunjukkan pada gambar 5. Pada saat $\tau_b > \tau_{ce}$ terjadi kenaikan konsentrasi suspensi karena adanya erosi.

Pada saat terjadi pengendapan konsentrasi suspensi turun secara drastis. Kondisi awal adalah konsentrasi merata pada seluruh kedalaman. Dari gambar hasil model, pada awal hitungan konsentrasi suspensi di permukaan dan tengah kedalaman menurun sedang konsentrasi di dasar naik. Hal ini disebabkan karena suspensi pada bagian atas kedalaman turun ke bagian dasar. Pada mulanya konsentrasi di dasar naik, tetapi kemudian turun lagi. Berkurangnya konsentrasi di dasar sangat besar. Keadaan ini menunjukkan bahwa kecepatan aliran yang terjadi di depan intake tidak mampu menahan partikel sedimen selalu dalam keadaan suspensi dalam jumlah besar (konsentrasi tinggi). Pada sekitar jam ke 10 terjadi erosi cukup besar (berkaitan dengan tegangan geser yang besar) yang ditandai dengan kenaikan konsentrasi yang tinggi.

Distribusi suspensi pada kedalaman untuk ketiga konsentrasi awal ditunjukkan pada gambar 6. Pada gambar tersebut gradien konsentrasi di dekat dasar sangat besar, sedang di atas kedalaman -10 m distribusi konsentrasi hampir seragam.

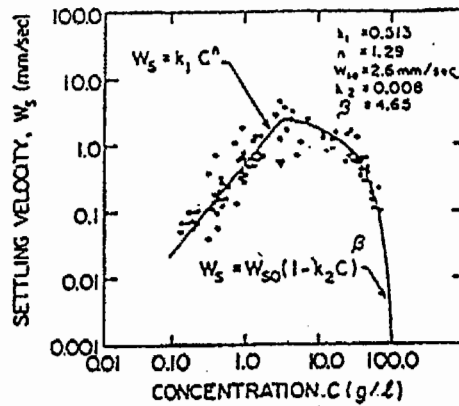
Konsentrasi di dasar sangat besar yang kemudian turun dengan cepat. Hal ini disebabkan karena turbulensi yang terjadi pada kondisi aliran yang ada tidak mampu membawa suspensi lebih tinggi (ke arah atas). Konsentrasi maksimum pada kedalaman -3,0 m (elevasi dasar intake yang disarankan) adalah 0,42 gr/l atau sekitar 42% dari konsentrasi maksimum yang terjadi di dasar.

KESIMPULAN

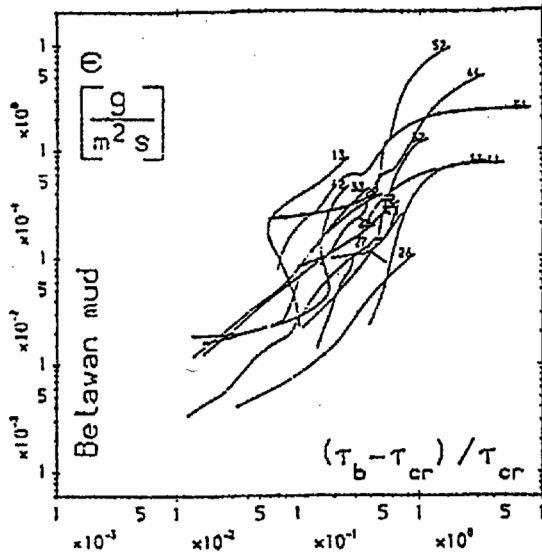
Model yang dikembangkan tidak memperhitungkan transpor dalam arah horisontal, namun demikian hasil model sudah memberikan karakteristik yang benar. Prediksi yang diperoleh dapat digunakan sebagai acuan di dalam menentukan elevasi dasar bangunan pengambilan air PLTGU Belawan. Model masih bisa dikembangkan dengan memperhitungkan transpor dalam arah horisontal (model tiga dimensi). Dengan model tiga dimensi akan diperoleh hasil yang lebih benar, tetapi penyelesaian persamaan yang ada menjadi jauh lebih rumit.

DAFTAR PUSTAKA

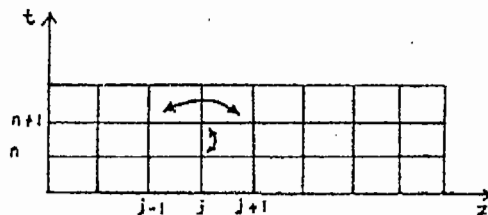
- Elder, J.W., The dispersion of mashed fluid in turbulence, Journal of Fluids Mechanics, Vol 5, 1959.
- Mehta, A.J., Characterization of cohesive sediment properties and transport process in Estuaries, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, 1984.
- Triatmodjo, B., Etude Numerique de la Dynamique du Tansport en Suspension dans les Estuaries, These de Docteur Ingenieur, USTMG, Grenoble, France, 1987.



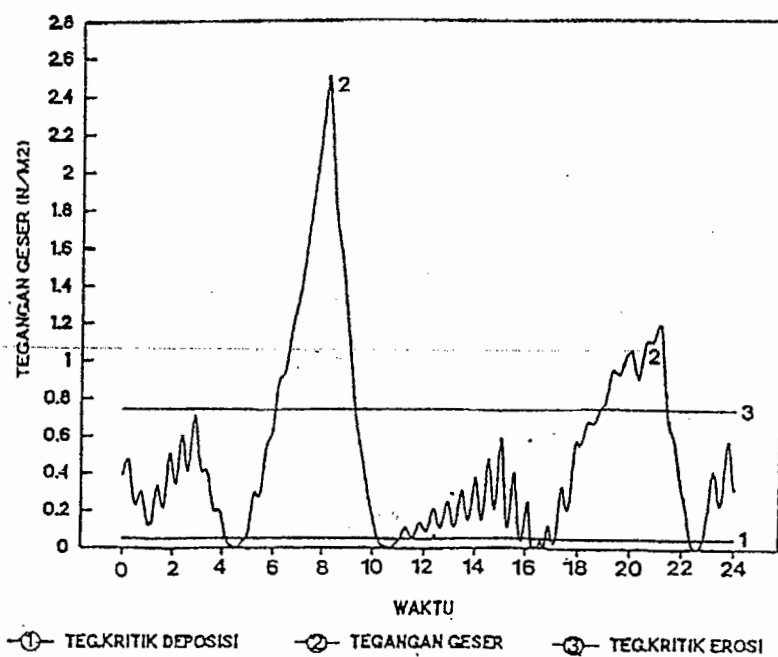
Gambar 1. Kecepatan endap fungsi konsentrasi



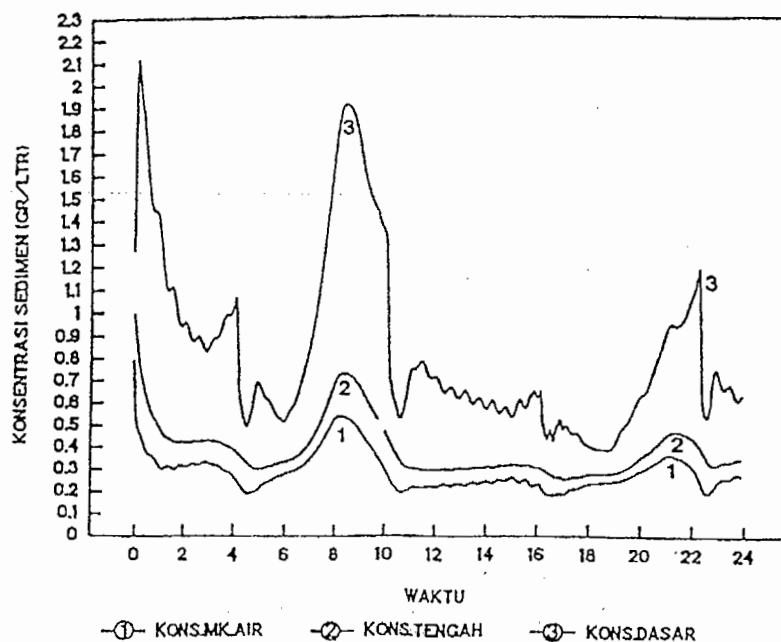
Gambar 2. Fluks erosi fungsi tegangan geser terlampaui



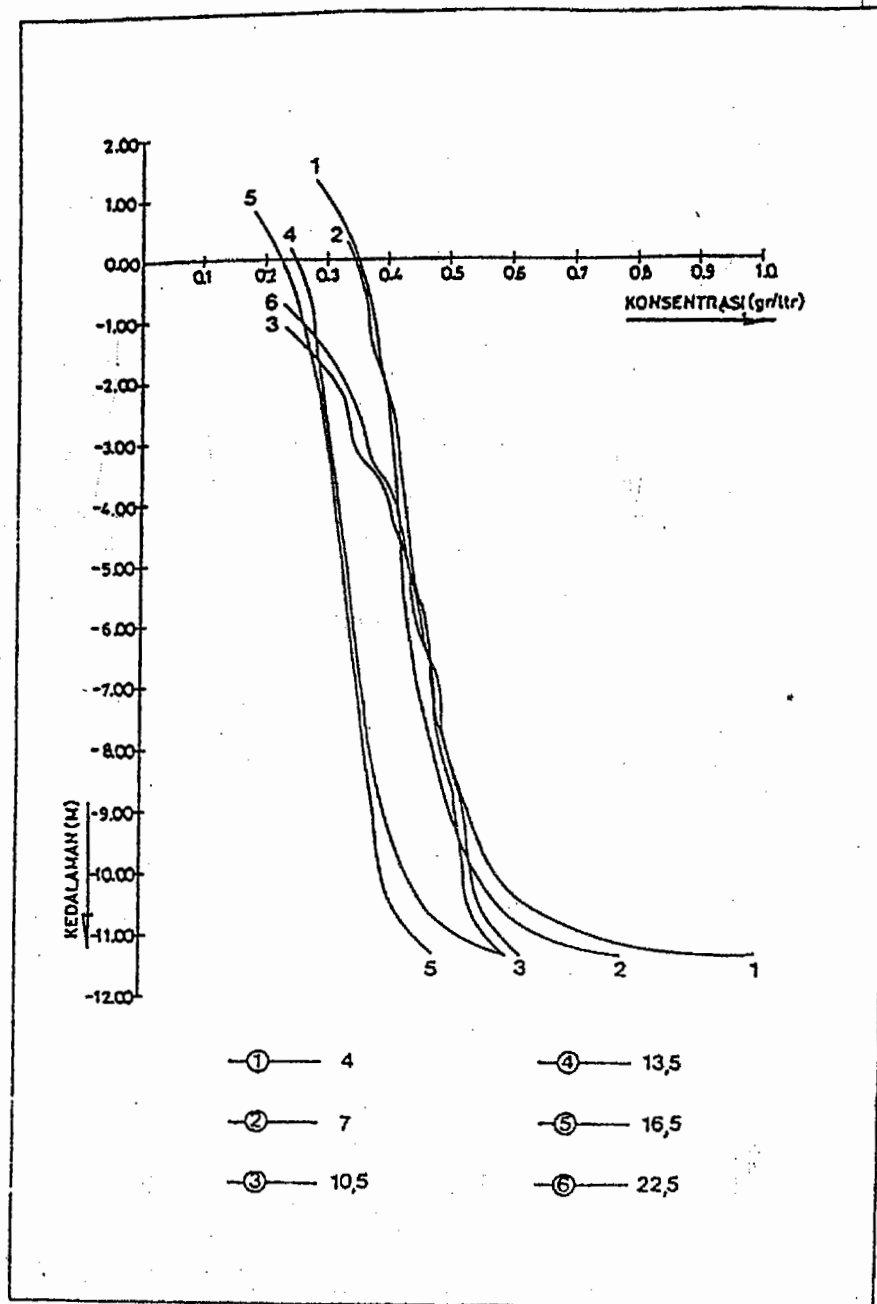
Gambar 3. Skema numeris



Gambar 4. Tegangan geser fungsi waktu
di lokasi bangunan pengambilan



Gambar 5. Konsentrasi suspensi fungsi waktu
di lokasi bangunan pengambilan



Gambar 6. Distribusi vertikal konsentrasi suspensi di lokasi bangunan pengambilan